نشریهٔ مهندسی متالورژی و مواد(۱۲۴-۱۰۷)
DOI: 10.22067/jmme.2021.70720.1017
سال سی و سه، شمارهٔ یک، ۱٤۰۰

بررسی دقت روابط تحلیلی مرسوم درجهت پیش‌بینی خواص نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانوذرات مختلف*

مقاله پژوهشی

سینا مسلمان(۱) سامرند رش‌احمدی(۲)

چکیده به‌منظور پیش‌بینی رفتار و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با نانوذرات مختلف مدل‌های مختلف تحلیلی میکرومکانیکی و ماکرومکانیکی ارائه شده است. نوع، ابعاد و مشخصات مکانیکی مادهٔ پایه و تقویت‌کننده از جمله مواردی هستند که در مدل‌های تحلیلی مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند. در برخی از مدل‌ها فرض‌ها و ساده‌سازی‌هایی انجام شده‌است که نتیجهٔ آن ارائهٔ روابطی است که پارامترهای کم‌تری را درگیر می‌کند. در برخی موارد این ساده‌سازی‌ها منجر به عدم دقت در پیش‌بینی نتایج می‌شوند. هدف از پژوهش پیش‌رو مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی با مدل‌های مطرح‌شده و بررسی دقت آن‌ها و درنتیجه ارائهٔ مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی خواص نانوکامپوزیت‌های مورد مطالعه است. به این منظور پلیمر پلی‌متیل‌متاکریلات (PMMA) به‌عنوان مادهٔ پایه و نانوذرات TiO_2، SiO_2 و Al_2O_3 به‌عنوان تقویت‌کننده انتخاب شد. در این مطالعه مدول الاستیسیتهٔ مواد در بیشترین حالت به‌ترتیب حدود ۷، ٤ و ٤ درصد نسبت‌به نمونهٔ پایه افزایش نشان دادند. نتایج حاصل از آزمایش استخراج گردید و با مدل‌های تحلیلی مطرح‌شده مورد مقایسه قرار گرفت. مقایسه‌ها نشان داد که مدل سه‌بعدی پن نتایج را با دقت مناسبی نسبت‌به نتایج آزمایشگاهی برای اکثریت نمونه‌ها پیش‌بینی می‌کند.

واژه‌های کلیدی نانوکامپوزیت، خواص مکانیکی، مدل‌های تحلیلی، نانوذرات، مدول یانگ.

مقدمه

از زمان‌های گذشته افزودن ماده‌ای به‌عنوان فاز دوم به ماده-پایه، یکی از اصلی‌ترین راه‌ها برای بهبود خواص مکانیکی محسوب می‌شود [3-1]. در سال‌های اخیر، مواد مرکب یا کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف به‌دلیل خواص ترمودینامیکی مناسب، دوام و وزن پایین و توانایی بالا در تحمل بار بسیار مورد توجه و استقبال قرار گرفته‌اند و روز به روز بر کاربرد آن‌ها در حوزه‌های مختلف افزوده می‌شود. اخیراً افزودن تقویت‌کننده‌هایی در ابعاد نانو منجر به تولید نانوکامپوزیت‌هایی شده‌است که به‌خاطر خواص فوق‌العادهٔ مکانیکی ازجمله نسبت استحکام به وزن بالا، توجهات فراوانی را به خود جلب کرده‌اند [5-4].

در مقایسه با فناوری میکرو، نانوتکنولوژی عملکرد و نمودی کاملاً متفاوت نشان می‌دهد. محصولات نانوکامپوزیتی حاوی تقویت‌کننده‌هایی در ابعاد نانو (کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر) هستند. اکثر خواص مکانیکی ازجمله مدول یانگ و پایداری حرارتی [7-6]، مدول و استحکام خمشی [7]، قابلیت برش‌کاری [8]، چقرمگی شکست [9] و رسانایی الکتریکی و حرارتی [10] امکان بهبود توسط نانوذرات تقویت‌کننده را دارند. درواقع، برای تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری با خواص مطلوب، انواع مختلفی از نانوذرات می‌توانند به مادهٔ پایه افزوده شوند [12-11]. در همین راستا، محققان درمورد محصولات فعلی و آینده مرتبط با علوم نانو مطالعات زیادی انجام داده‌اند؛ آن‌ها پیش‌بینی می‌کنند که نانومواد، ابعاد جدیدی در کاربردهای صنعتی بگشایند.

درراستای بهبود رفتار مکانیکی مواد با افزودن تقویت‌کننده‌های مختلف، مطالعات متعددی انجام گرفته‌است. در این ارتباط می‌توان به بررسی رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های دندان‌پزشکی برپایهٔ رزین تقویت‌شده با TiO_2، مورد مطالعهٔ هُوا و همکارانش [13] اشاره کرد. در این بررسی عملی اثرات نسبت حجمی، نسبت ابعادی و دیگر شاخص‌های بین مادهٔ پایه و تقویت‌کننده مورد بررسی قرار

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۳/۱۰ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۹/۱۵ می‌باشد.
(۱) دانش‌آموختهٔ کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه.
(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه.
Email: s.rashahmadi@urmia.ac.ir

گرفته‌است. نتایج حاصل، برتری آشکار خواص مکانیکی کامپوزیت تقویت‌شده با نانوذرات در مقایسه با کامپوزیت‌های تقویت‌شده با میکروالیاف را نشان می‌دهد. در کنار مطالعات عملی، بررسی‌های تحلیلی نیز مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این بررسی‌ها تمرکز برروی مدل‌های تئوری است که به‌کمک آن‌ها می‌توان رفتار مواد مرکب با درصدهای مختلف از تقویت‌کننده را پیش‌بینی کرد. این مدل‌ها با در نظر گرفتن پارامترهایی از قبیل شکل، اندازه و نوع ذرات مادهٔ پایه و پرکننده ارائه شده‌اند. استفاده از این روابط درجهت کاهش آزمایش‌های عملی و کاهش اتلاف زمان و متعاقباً هزینه‌های مالی ناشی از آن است. از پژوهش‌های صورت‌گرفته در این زمینه می‌توان به کار تاکر و لیانگ [14] اشاره کرد. در این مطالعه سعی شده‌است سفتی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کوتاه هم‌جهت را بااستفاده از مدل‌های میکرومکانیکی، پیش‌بینی کنند. مدل‌های مختلف مطرح و مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و نهایتاً مدل موری تاناکا به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای پیش‌بینی سفتی مادهٔ حاصل انتخاب شده‌است. سیف‌الاسلام و همکارانش [15] اثرات ترکیب درصدها و اندازه‌های مختلف از نانوذرات اکسیدسیلیسیوم با اپوکسی را مورد مطالعهٔ آزمایشگاهی و تحلیلی قرار داده‌اند. در این بررسی نشان داده شده‌است که مدول یانگ، تنش نهایی و تنش تسلیم نانوکامپوزیت حاصل با افزایش ذرات تقویت‌کننده به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. از دیگر کارهای پیشین درزمینهٔ نانوکامپوزیت‌ها می‌توان به تحقیق فریدون و همکارانش [16] اشاره کرد. در این مطالعه اثرات افزودن درصدهای مختلف نانولوله‌های کربنی به پلی‌پروپلین مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج آزمایش برای ارائهٔ مدلی درجهت پیش‌بینی رفتار نانوکامپوزیت حاصل با روابط تحلیلی مقایسه شده‌است.

از آن‌جایی که در مطالعات گذشته مقایسهٔ جامعی بین روابط تحلیلی موجود صورت نگرفته بود، تصمیم به بررسی و انجام این مهم و کارایی‌سنجی روابط موجود در قیاس با یکدیگر گرفته شد. ابتدا مدل‌های مختلف تحلیلی معرفی می‌شوند. سپس اثرات درصدهای مختلف حجمی نانوذرات اکسیدی تیتانیوم، سیلیسیوم و آلومینیوم برروی خواص مکانیکی پلیمر پلی‌متیل‌متاکریلات (Poly methyl methacrylate (PMMA)) مورد مطالعه قرار می‌گیرد و در انتها نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از روابط تحلیلی مذکور مقایسه می‌شوند تا دقیق‌ترین مدل یا مدل‌ها در تخمین خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با نانوذرات اکسیدی ذکرشده، انتخاب شود.

مدل‌های تئوری

مدل‌هایی که برای توضیح وضعیت کلی و یا بیان رفتار یک ماده طراحی شده‌اند، به نام مدل‌های تئوری شناخته می‌شوند. هدف از ارائهٔ این مدل‌ها، استخراج رابطه‌ای است که درنهایت بتوان با کمک آن‌ها رفتار ماده را به‌راحتی و بدون نیاز به آزمایش‌های عملی پیش‌بینی کرد. در ادامه تعدادی از پرکاربردترین مدل‌های ماکرومکانیکی و میکرومکانیکی [17] درجهت پیش‌بینی رفتار کششی کامپوزیت‌ها مطرح شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اساس این روابط برپایهٔ قانون اختلاط کامپوزیت‌ها (رابطهٔ ۱) استوار است. در ادامه همهٔ مدل‌ها تشریح و پارامترهای استفاده‌شده در این روابط و خود روابط در قالب جدول (۱) و جدول (۲) مطرح شده‌اند.

جدول ۱ پارامترهای استفاده‌شده در روابط مدل‌های تحلیلی

شرح	نماد
مدول یانگ کامپوزیت	Ec
مدول یانگ تقویت‌کننده	Ef
مدول یانگ ماتریس	Em
مدول برشی کامپوزیت	Gc
مدول برشی تقویت‌کننده	Gf
مدول برشی ماتریس	Gm
درصد حجمی تقویت‌کننده	Vf
مدول بالک کامپوزیت	Kc
مدول بالک تقویت‌کننده	Kf
مدول بالک ماتریس	Km
نسبت پواسون ماتریس	vm
نسبت پواسون تقویت‌کننده	vf
طول ذرات تقویت‌کننده	l
قطر ذرات تقویت‌کننده	d

جدول ۲ روابط ارائه‌شده برای مدل‌های تحلیلی

رابطه	شمارهٔ رابطه
$E_c=V_f E_f + (1-V_f)E_m$	(۱)
$E_c \approx V_f (\frac{16}{45} E_f + 2E_m) + \frac{8}{9} E_m$	(۲)
$G_c \approx V_f (\frac{2}{15} E_f + \frac{3}{4} E_m) + \frac{1}{3} E_m$	(۳)
$E_{c,2D}=\frac{V_f}{\pi} E_f + \left(1-\frac{V_f}{\pi}\right) E_m$	(٤)
$\nu_{c,2D}=\frac{V_f}{\pi} \nu_f + \left(1-\frac{V_f}{\pi}\right) \nu_m$	(۵)
$E_{c,3D}=\frac{V_f}{2\pi} E_f + \left(1-\frac{V_f}{2\pi}\right) E_m$	(٦)
$\nu_{c,3D}=\frac{V_f}{2\pi} \nu_f + \left(1-\frac{V_f}{2\pi}\right) \nu_m$	(۷)
$E_{c,2D}=\frac{V_f}{3} E_f + (1+V_f)E_m$	(۸)
$E_{c,3D}=\frac{V_f}{6} E_f + [1+(1+\nu_m)V_f]E_m$	(۹)
$E_c =\frac{3}{8}[V_f E_f + (1-V_f) E_m] + \frac{5}{8}\left[\frac{E_f E_m}{E_m V_f + (1-V_f) E_f}\right]$	(۱۰)
$\frac{E_c}{E_m}=\frac{3}{8}\left[\frac{1 + \frac{l}{d} n_l V_f}{1 - n_l V_f}\right] + \frac{5}{8}\left[\frac{1 + 2n_T V_f}{1 - n_T V_f}\right]$	(۱۱-الف)
$n_l = \left(\frac{E_f}{E_m} - 1\right) \Big/ \left(\frac{E_f}{E_m} - 2\frac{l}{d}\right)$	(۱۱-ب)
$n_T = \left(\frac{E_f}{E_m} - 1\right) \Big/ \left(\frac{E_f}{E_m} + 2\right)$	(۱۱-ج)
$\frac{E_c}{E_m}=\frac{1}{2}\left[\frac{1 + \frac{l}{d} n_l V_f}{1 - n_l V_f}\right] + \frac{4}{5}\left[\frac{1 + 2n_T V_f}{1 - n_T V_f}\right]$	(۱۲)
$\frac{E_c}{E_m}=1+2.5 V_f$	(۱۳)
$\frac{1}{E_{cT}}=\frac{V_f}{E_f}+\frac{1-V_f}{E_m}$	(۱٤)
$E_{c,L}=V_f E_f + (1-V_f)E_m$	(۱۵)
$K_{c,upper}=K_f+(1-V_f)\left[\frac{1}{K_m-K_f}+\frac{3V_f}{3K_f+4G_f}\right]^{-1}$	(۱٦)
$K_{c,lower}=K_m+V_f\left[\frac{1}{K_f-K_m}+\frac{3(1-V_f)}{3K_m+4G_m}\right]^{-1}$	(۱۷)
$G_{c,upper}=G_f+(1-V_f)\left[\frac{1}{G_m-G_f}+\frac{6V_f(K_f+2G_f)}{5G_f(3K_f+4G_f)}\right]^{-1}$	(۱۸)
$G_{c,lower}=G_m+V_f\left[\frac{1}{G_f-G_m}+\frac{6(1-V_f)(K_m+2G_m)}{5G_m(3K_m+4G_m)}\right]^{-1}$	(۱۹)
$E=\frac{9K}{1+3K/G}$	(۲۰)

مدل تقریب مانرا (Manera Approximation Model)

مانرا [18] رابطه‌ای تقریبی برای پیش‌بینی خواص الاستیک کامپوزیت‌های شکل‌گرفته با تقویت‌کننده‌های طول‌کوتاه و با چینش تصادفی پیشنهاد داده‌است. خواص تغییرناپذیر کامپوزیت‌ها که توسط تسای (Tsai) و پاگانو (Pagano) [19] مطرح شده بودند، در کنار فرمولاسیون میکرومکانیکی پاک (Puck) [18] برای این رابطه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مانرا تعدادی فرض در نظر گرفته و رابطهٔ نامتغیرهای پاک را ساده‌سازی کرده‌است. این فرض‌ها شامل نسبت ابعادی بالای فیبرها (بیشتر از ۳۰۰)، فیبرهای دوبعدی با توزیع تصادفی و رفتار فیبرهای ناپیوسته با توزیع تصادفی به‌عنوان ورقه‌هایی با تعداد لایه‌های نامحدود که در همه جهات چیده شده‌اند، است. در نتیجه رابطهٔ تقریب مانرا برای مدول یانگ و برشی به‌ترتیب به‌شکل رابطهٔ (۲) و رابطهٔ (۳) مطرح شده‌است. از روابط (۲) و (۳) استنتاج می‌شود که نتایج به‌دست‌آمده، رابطهٔ $G=\frac{E}{2(1+\nu)}$ را تصدیق می‌کنند که در آن ν ضریب پواسون، E مدول یانگ و G مدول برشی است. برای حصول نتایج با دقت مناسب، مانرا پیشنهاد داد که E_m در محدودهٔ $2\ GPa \le E_m \le 4\ GPa$ انتخاب شود.

مدل پن یا رابطهٔ چگالی الیاف (Modified Density Function-Pan's Model)

اساس ایدهٔ تئوری پن [20] ایجاد رابطه‌ای بین نسبت حجمی و نسبت سطحی تقویت‌کننده در حالتی است که تقویت‌کننده‌ها در یک جهت چیده نشده باشند. پن در این مدل بااستفاده از بسط قانون سادهٔ اختلاط کامپوزیت‌ها و بهره‌گیری از یک معادلهٔ چگالی فرضی، رابطه‌ای را برمبنای جهت‌گیری نامنظم الیاف در فضای دوبعدی و سه‌بعدی ارائه داده‌است (روابط ٤ تا ۷). این مدل برای کامپوزیت‌های با جهت‌گیری منظم و با طول بلند نیز معتبر است.

مدل کریستینسن و وال (Christensen and Waal's Model)

کریستسن و وال [21] برای بررسی رفتار یک کامپوزیت با جهت‌گیری تصادفی الیاف تقویت‌کننده همانند مدل پن، دو سیستم دوبعدی و سه‌بعدی در نظر گرفته‌اند. در این مدل بااستفاده از بررسی برهم‌کنش بین ماتریس و ذرات تقویت‌کننده، و در نظر گرفتن این فرض که درصد حجمی تقویت‌کننده باید کم‌تر از ۰/۲ باشد، مدول یانگ در حالت دوبعدی و سه‌بعدی به شکل روابط (۸) و (۹) مطرح می‌شود. بین نتایج رابطهٔ (۸) و نتایج حاصل از آزمایش، مقایسهٔ دیگری توسط لی (Lee) [22] انجام شده‌است. در این بررسی نشان داده شده‌است که گاهی در نسبت‌های حجمی پایین تقویت‌کننده، نتایج با اختلاف در حدود ۰ تا ۱۵٪ بیشتر از خروجی‌های آزمایش هستند. این اختلاف به پیوندهای غیرمؤثر و اثر انتهایی الیاف ریز نسبت داده شده‌است.

مدل هیرش (Hirsch's Model)

هیرش [23] با انجام مطالعاتی، مدول یانگ کامپوزیت را به‌صورت ترکیبی از مدول طولی و عمودی در نظر گرفته‌است. رابطه‌ای هم که ارائه شده (رابطهٔ ۱۰)، متشکل از دو قسمت است که بخش اول آن ضریبی از مدول طولی و بخش دوم آن ضریبی از مدول عمودی کامپوزیت است.

رابطهٔ اصلاح‌شدهٔ هالپین- تسای (Modified Halpin-Tsai relation)

این رابطه با اعمال مقادیر مربوط به تنش طولی و عمودی کامپوزیت از رابطهٔ هالپین- تسای [24] در مدل هیرش (رابطهٔ ۱۰) تشکیل می شود و به رابطهٔ اصلاح شدهٔ هالپین- تسای [25] معروف است. مدل مذکور برای مواد کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کوتاه و جهت‌گیری تصادفی، پاسخ‌های بسیار مناسبی را پیش‌بینی می‌کند (روابط ۱۱- الف تا ۱۱- ج).

رابطهٔ لیونگود و گوتلر (Lavengood and Goettler relation)

لیونگود و گوتلر [22] با انجام مطالعات و اصلاح ضرایب عددی رابطهٔ تغییریافتهٔ هالپین- تسای، مدلی دیگر برای پیش‌بینی رفتار کامپوزیت‌ها پیشنهاد دادند. در این رابطه، به‌جای ضرایب $\frac{۳}{۸}$ و $\frac{۵}{۸}$ از رابطهٔ (۱۱- الف)، به‌ترتیب $\frac{۱}{۲}$ و $\frac{٤}{۵}$

قرار داده می‌شود تا مدل جدید حاصل شود (رابطهٔ ۱۲).

مدل اینشتین (Einstein's Model)

اینشـتین [26-27] برای توصـیف ارتباط بین نسـبت حجمی ذرات صلب کروی تقویت‌کننده و مدول یانگ کامپوزیت‌ها، یک مدل خطی پیشنهاد داده‌است. با فرض چسبندگی کامل بین ذرات تقویت‌کننده و مادهٔ پایه و نبود عکس‌العمل بین ذرات، رابطهٔ حاصل از این مدل به شکل رابطهٔ (۱۳) است. این رابطه فقط برای بار گذاری های کم معتبر اسـت و برهم‌کنش‌های زیرذره‌ای را در نظر نمی‌گیرد.

مدل کران بالای وویگت (Voigt) و کران پایین رئوس (Reuss)

در این مدل فرض شـده‌اسـت که تقویت‌کننده‌ها و فاز زمینه تحت کرنش یک‌نواخت مشابهی درجهت الیاف قرار بگیرند. باتوجه به همین فرض، وویگت [28] مدول مؤثر در امتداد تقویت‌کننده‌ها را به‌شـکل رابطهٔ (۱) اسـتخراج کرده‌اسـت. رئوس [29] نیز رابطـهٔ ذکرشـده را برای حـالـت تنش یک‌نواخت درجهت عمود بر امتداد الیاف تقویتی اعمال کرده و رابطهٔ مدول یانگ مؤثر به‌شـکل رابطهٔ (١٤) درآمده‌اسـت. در این رابطه زیرنویس‌های L و T به‌ترتیب به جهت‌های طولی و عمود بر طولی در تقویت‌کننده اشـاره دارند. معادلهٔ (۱) یک رابطه با کوپلینگ موازی اسـت که به نام قانون اختلاط نیز شناخته می شود؛ درحالی‌که معادله‌های (١٤) و (۱۵) رابطه هایی با کوپلینگ معکوس‌اند و با نام قانون اختلاط معکوس شناخته می‌شوند.

معادلات (۱)، (١٤) و (۱۵) می‌توانند برای همهٔ کامپوزیت‌های دوفازی فارغ از شکل تقویت‌کننده تعمیم داده شوند. در روابط (١٤) و (۱۵)، E_{cL} و E_{cT} به‌ترتیب کران‌های بالا و پایین مدول یانگ کامپوزیت‌ها را بیان می‌کنند. هم‌چنین در این روابط، فقط سه پارامتر درگیر هستند که عبارتند از مدول یانگ تقویت‌کننده، ماتریس و نسبت حجمی تقویت‌کننده.

مدل کران بالا و پایین هاشین (Hashin) و اشتریکمن (Shtirkman)

هاشـین و اشـتریکمن [30-31] کامپوزیت را به‌صـورت میکرو سکوپی هم سان و شبه‌هم‌گن در نظر گرفتند. در این مدل شـکل تقویت‌کننده عامل محدودکننده محسـوب نمی‌شـود؛ با این فرض کران بالا و پایین کامپوزیت را براساس اصول متغیر الاستیسیته تخمین زدند. بسته به این‌که سـفتی فاز زمینه بیش‌تر یا کم‌تر از تقویت‌کننده باشـد، کران بالا و پایین مدول بالک ($K_{c,upper}$ و $K_{c,lower}$) و مدول برشـی ($G_{c,upper}$ و $G_{c,lower}$) کـامپوزیـت از روابط (١٦) الی (۱۹) حاصـل می‌شـود. کران بالا و پایین مدول یانگ نیز از رابطهٔ (۲۰) قابل محاسبه خواهد بود.

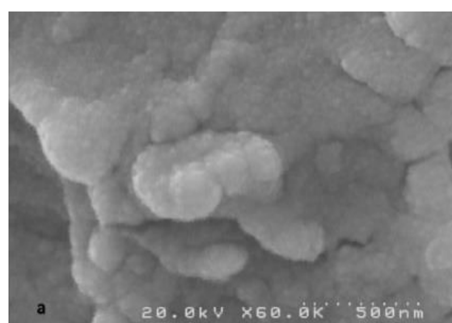
مراحل تجربی

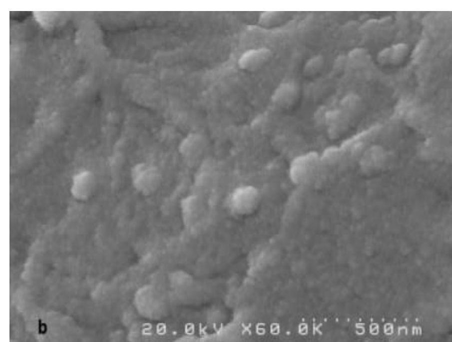
آماده‌سازی نمونه‌ها طبق شرح در ادامه در چندین مرحله صورت گرفت. در گام اول نانوذرات تقویت‌کننده در درصدهای جرمی موردنظر با پلیمر (که از قبل به‌منظور رطوبت‌زدایی در دستگاهی مجزا خشک شده بود) ترکیب و تبدیل به گرانول شدند. پلی‌متیل‌متاکریلات به‌عنوان فاز زمینه و نانوذرات اکسیدی تیتانیوم، سیلیسیوم و آلومینیوم با اندازهٔ ذرات تقریباً ۲۰ نانومتر به‌عنوان تقویت‌کننده انتخاب شدند. در این مرحله از دستگاه اکسترودر دومادورنه ZSK-25 (ساخت شرکت آلمانی کپریون ورنر و فلایدرر (Coperion Werner & Pfleiderer)) برای اختلاط ذوبی مواد استفاده گردید و گرانول‌های نانوکامپوزیتی در درصدهای جرمی مدنظر حاصل گردیدند. پیش از تزریق در قالب، برای دومین بار خشک کردن گرانول‌ها صورت گرفت. در گام بعدی گرانول‌ها به‌روش قالب‌گیری تزریقی در قالب‌های نمونهٔ استاندارد کشش تزریق و نمونه‌های مورد نیاز آزمایش مطابق شکل (۱) آماده شدند. برای انجام تست کشش از دستگاه تست کشش (SANTAM STM-150) طبق استاندارد ASTM-D638 استفاده شد. هم‌چنین به‌منظور بررسی ساختار نمونه‌های ساخته‌شده، از نمونه‌ها تست SEM گرفته شد. همان‌گونه که در شکل (۲) مشخص است، ناحیهٔ کلوخه‌ای در خروجی تست‌ها مشاهده نمی‌شود و توزیع ذرات تقویت‌کننده به‌شکل مناسب و یک‌نواخت صورت

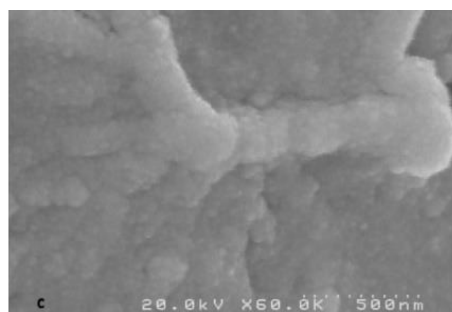
گرفته‌است.



شکل ۱ نمونه‌های ساخته‌شده برای تست کشش







شکل ۲ تصویر SEM از سطح مقطع نمونه‌های حاوی a) ٪۲ وزنی TiO_2، b) ٪۲ وزنی SiO_2 و c) ٪۱ وزنی AL_2O_3

نتایج و بحث

برای انجام محاسبات، اولین گام تبدیل نسبت‌های جرمی به حجمی است. در جدول (۳) برای تمام نمونه‌ها، نسبت‌های حجمی، باتوجه به درصد وزنی نانوکامپوزیت‌ها و چگالی آن‌ها، به تفکیک محاسبه شده‌است.

جدول ۳ چگالی و کسر حجمی نمونه‌های مورد بررسی

ماده	چگالی (gr/cm^3)	V_f
Pure PMMA	۱/۱۸۰	- - -
PMMA + TiO_2 0.5 wt %	۱/۱۸۹	۰/۰۰۱۵
PMMA + TiO_2 1.0 wt %	۱/۱۹۳	۰/۰۰۳۰
PMMA + TiO_2 2.0 wt %	۱/۲۰۲	۰/۰۰۶۰
PMMA + SiO_2 0.5 wt %	۱/۱۸۳	۰/۰۰۲۵
PMMA + SiO_2 1.0 wt %	۱/۱۸۶	۰/۰۰۵۰
PMMA + SiO_2 2.0 wt %	۱/۱۹۲	۰/۰۱۰۰
PMMA + Al_2O_3 0.5 wt %	۱/۱۸۴	۰/۰۰۱۵
PMMA + Al_2O_3 1.0 wt %	۱/۱۸۸	۰/۰۰۳۰

نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۴) نشان می‌دهد که تأثیر نانوذرات تیتانیوم‌دی‌اکسید برروی پلیمر مورد مطالعه بیشتر از دیگر تقویت‌کننده‌ها بوده‌است. این تقویت‌کننده در هر سه درصد وزنی در ترکیب با مادهٔ پایه منجر به افزایش مدول یانگ کامپوزیت حاصل شده‌است. این نتایج در هماهنگی با نتایج ترکیب اکسید تیتانیوم و رزین اپوکسی هستند [32]. در پژوهش معرفی‌شده نیز افزودن درصدهای بیشتر تقویت‌کننده موجب بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت حاصل‌شده بود.

هم‌چنین از نتایج چنان برمی‌آید که این روند افزایشی مدول یانگ درمورد تقویت‌کنندهٔ اکسید سیلیسیم نیز حفظ شده‌است؛ اما نکته قابل توجه به نمونهٔ حاوی ۰/۵ درصد وزنی برمی‌گردد که مدول یانگ در ابتدا کاهش را نشان می‌دهد، اما در درصدهای بالاتر منجر به بهبود آن می‌شود. در مورد اکسید آلومینیوم روند رشد برعکس اکسید تیتانیوم و سیلیسیم نزولی بوده‌است و نشان از این دارد که ۱/۰ درصد وزنی از تقویت‌کننده اکسید آلومینیوم منجر به کاهش مدول

یانگ نانوکامپوزیت تولیدشده می‌گردد. این کاهش را می‌توان به این موضوع نسبت داد که در مقادیر بیشتر از ۰/۵ درصد وزنی از تقویت‌کننده، پیوند بین ذرات به‌خوبی شکل نگرفته و استحکام بین پیوندهای تشکیل‌یافته کاهش داشته‌است.

جدول ٤ نتایج حاصل از تست نمونه‌های مورد بررسی

ماده	مدول الاستیک (MPa)	تغییر نسبت‌به نمونه خالص (%)
Pure PMMA	۲۹۱۳/۷۷	- - -
PMMA + TiO_2 0.5 wt %	۲۹٤۹/۰۰	۱/۲۱
PMMA + TiO_2 1.0 wt %	۳۰۲۲/۹۰	۳/۷۵
PMMA + TiO_2 2.0 wt %	۳۱۱۱/۵۰	۷۹/٦
PMMA + SiO_2 0.5 wt %	۲۸٦۰/۹۰	-۱/۸۱
PMMA + SiO_2 1.0 wt %	۲۹٦٤/٦۰	۱/۷٤
PMMA + SiO_2 2.0 wt %	۳۰۲٤/۲۰	۳/۷۹
PMMA + Al_2O_3 0.5 wt %	۳۰۳۲/٦۰	٤/۰۸
PMMA + Al_2O_3 1.0 wt %	۲٦۹۸/۹۰	-۷/۳۷

نهایتاً نتایج حاصل از آزمایش‌های تحلیلی با نتایج حاصل از رابطه‌های (۲۰-۲) مقایسه شده و در جداول (٦) تا (۸) آورده شده‌است. برای حصول نتایج هر کدام از مدل ها، از پارامتر های موجود در جدول (۵) استفاده شده‌است. در ضمن توجه شود که در انجام محاسبات روابط هالپین-تسای و لیونگود- گوتلر نسبت منظر یا نسبت ابعادی (l/d) با فرض کروی بودن نانوذرات، ۱ در نظر گرفته شده است. در صد اختلاف نتایج هر کدام از مدل‌ها با نمونهٔ آزمایش‌شده نیز محاسبه شده و در جداول ارائه شده‌است.

همان‌گونه که در نتایج موجود در جداول هم مشخص است، نتایج حاصل از آزمایش و مدل‌های تحلیلی باهم سازگارند. هرچند باید توجه کرد که هدف مدل کران بالای وویگت و کران پایین رئوس و هم‌چنین مدل کران بالا و پایین هاشین و اشتریکمن بیشتر مشخص کردن بازه‌ای برای خواص مکانیکی کامپوزیت حاصل است. اندازهٔ بازهٔ مورد نظر به خواص مکانیکی نانوکامپوزیت و مادهٔ پایه و هم‌چنین درصد حجمی نانوکامپوزیت بستگی دارد. مشخصاً با افزایش در صد حجمی، بازه نیز بزرگ‌تر می شود و خطا هم افزایش می‌یابد. درنتیجه درصد اختلاف بالای مدول یانگ کامپوزیت حاصل با کران بالای وویگت و یا کران بالای ا شتریکمن کاملاً قابل توجیه ا ست و با صحت مدل‌ها و یا نتایج حاصل از آزمایش متناقض نیست.

مورد حائز اهمیت دیگر در نتایج به‌دست‌آمده، دقت بیشتر مدل‌های سه‌بعدی پن و کریستین و وال نسبت‌به مدل‌های دو بعدی آن‌ها است. خطای بیشتر مدل‌های دوبعدی نسبت‌به امثال سه‌بعدی آن‌ها، به فرض‌های موجود در آن‌ها برمی‌گردد. در مدل‌های دوبعدی، فرض بر این است که الیاف نانوکامپوزیتی در امتداد صفحه پراکنده شدها ست. این فرض درمورد کامپوز یت ها با الیاف طول‌بلند که با روش هایی از قبیل تزریق در امتداد محور طولی تول ید شده‌اند صحت بیشتری دارد. درضمن، خطای بالای به‌د ست‌آمده از مدل لیونگود و گوتلر را می‌توان به این نکته ارتباط داد که این مدل بیشتر برای کامپوزیت‌ها با نسبت حجمی بالای فیلر طراحی شدها ست. در نتیجه خطای بالای این مدل در نمونه هایی با نسبت حجمی پایین (۰/۰۱ و کم‌تر) کاملاً قابل توجیه است. همان‌گونه که در جداول مشخص است، با بالاتر رفتن نسبت حجمی، خطای این مدل کم‌تر و کم‌تر شده‌است.

رفتار کامپوزیت در دو مورد اضافه کردن اکسید سیلیسیم با ۰/۵ درصد وزنی و اکسید آلومینیوم با ۱/۰ درصد وزنی با مدل‌های تحلیلی در تناقض است. در مورد اکسید سیلیسیم که تنها در درصد وزنی پایین، این رفتار را از خود نشان می‌دهد، می‌توان دلیل این ناسازگازی را به عدم پراکندگی یکنواخت نانوکامپوزیت‌ها ربط داد. درحالی‌که در مورد اکسید آلومینیوم با درصد وزنی بالاتر می‌توان این موضوع را به پیوند نامناسب بین ذرات تقویت‌کننده و مادهٔ پایه و یا عدم سازگاری بین اکسید آلومینیوم و پلی‌متیل-متاکریلات در درصدهای وزنی بالا ارتباط داد.

جدول ۵ خواص مکانیکی مواد استفاده‌شده

ماده	مدول یانگ (MPa)	مدول برشی (MPa)	مدول بالک (MPa)	ضریب پواسون
پلی‌متیل‌متاکریلات (PMMA)	۲۹۱۳/۷۷	۱۰۴۹/۶	۳۳۹۸	۰/۳۷۵
اکسید تیتانیم (TiO_2)	۲۳۷۲۵۰	۹۲۷۵۰	۲۱۰۲۰۰	۰/۲۸
اکسید سیلسیم (SiO_2)	۶۷۳۶۰	۲۸۴۵۰	۳۳۹۱۰	۰/۱۷
اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)	۲۳۹۷۵۰	۹۷۶۳۰	۱۶۰۳۸۰	۰/۲۷

جدول ٦ مدول یانگ حاصل از نتایج تحلیلی و مقایسه با مقادیر آزمایش‌شده برای نمونه‌های حاوی نانوذرات TiO_2

مدل	PMMA + TiO_2 0.5 wt % (MPa)	PMMA + TiO_2 1.0 wt % (MPa)	PMMA + TiO_2 2.0 wt % (MPa)
نتیجهٔ آزمایش	۲۹۴۹/۰۰	۳۰۲۲/۹۰	۳۱۱۱/۵۰
مدل تقریب مانرا	۲۷۲۵/۲۹	۲۸۶۰/۵۷	۳۱۳۱/۱۲
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۷/۵۸	-۵/۳۷	۰/۶۳
مدل پن دوبعدی	۳۰۲۵/۶۶	۳۱۳۷/۵۴	۳۳۶۱/۳۲
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۲/۶۰	۳/۷۹	۸/۰۳
مدل پن سه‌بعدی	۲۹۶۹/۷۱	۳۰۲۵/۶۶	۳۱۳۷/۵۴
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۰/۷۰	۰/۰۹	۰/۸۴
مدل کریستین و وال دوبعدی	۳۰۳۶/۷۷	۳۱۵۹/۷۶	۳۴۰۵/۷۵
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۲/۹۸	۴/۵۳	۹/۴۶
مدل کریستین و وال سه‌بعدی	۲۹۷۹/۰۹	۳۰۴۴/۴۱	۳۱۷۵/۰۶
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۱/۰۲	۰/۷۱	۲/۰۴
مدل هیرش	۳۰۴۸/۲۹	۳۱۸۲/۸۱	۳۴۵۱/۸۸
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۳/۳۷	۵/۲۹	۱۰/۹۴
مدل اصلاح شده هالپین- تسای	۲۹۲۵	۲۹۳۶/۲۷	۲۹۵۸/۹۱
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۰/۸۱	-۲/۸۷	-۴/۹۰
مدل لیونگود و گوتلر	۳۸۰۲/۴۶	۳۸۱۷/۰۶	۳۸۴۶/۴۰
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۲۸/۹۴	۲۶/۲۷	۲۳/۶۲
مدل اینشتین	۲۹۲۴/۷۰	۲۹۳۵/۶۲	۲۹۵۷/۴۸
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۰/۸۲	-۲/۸۹	-۴/۹۵
مدل وویگت	۳۲۶۵/۲۷	۳۶۱۶/۷۸	۴۳۱۹/۷۹
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۱۰/۷۲	۱۹/۶۴	۳۸/۸۳
مدل رئوس	۲۹۱۸/۰۹	۲۹۲۲/۴۳	۲۹۳۱/۱۴
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۱/۰۵	-۳/۳۲	-۵/۸۰
مدل کران بالای هاشین و اشتریکمن	۳۰۴۴/۱۸۱۹	۳۲۳۳/۲۵	۳۶۱۰/۸۲
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۳/۲۳	۶/۹۶	۱۶/۰۴
مدل کران پایین هاشین و اشتریکمن	۲۸۶۳/۶۸	۲۸۷۲/۵۴	۲۸۹۰/۳۲
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۲/۸۹	-۴/۹۷	-۷/۱۱

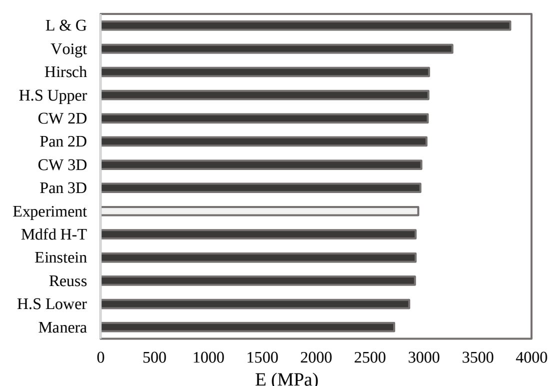
جدول ۷ مدول یانگ حاصل از نتایج تحلیلی و مقایسه با مقادیر آزمایش‌شده برای نمونه‌های حاوی نانوذرات SiO_2

مدل	PMMA + SiO_2 0.5 wt % (MPa)	PMMA + SiO_2 1.0 wt % (MPa)	PMMA + SiO_2 2.0 wt % (MPa)
نتیجهٔ آزمایش	۲۸۶۰/۹۰	۲۹۶۴/۶۰	۳۰۲۴/۲۰
مدل تقریب مانرا	۲۶۶۴/۴۷	۲۷۳۸/۹۲	۲۸۸۷/۸۳
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۶/۶۸	-۷/۶۱	-۴/۵۱
مدل پن دوبعدی	۲۹۶۵/۰۶	۳۰۱۶/۳۵	۳۱۱۸/۹۴
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۳/۶۴	۱/۷۵	۳/۱۳
مدل پن سه‌بعدی	۲۹۳۹/۴۲	۲۹۶۵/۰۶	۳۰۱۶/۳۵
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۲/۷۴	۰/۰۲	-۰/۲۶
مدل کریستین و وال دوبعدی	۲۹۷۷/۲۰	۳۰۴۰/۶۲	۳۱۶۷/۴۷
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۴/۰۶	۲/۵۶	۴/۷۴
مدل کریستین و وال سه‌بعدی	۲۹۵۱/۸۶	۲۹۸۹/۹۴	۳۰۶۶/۱۲
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۳/۱۸	۰/۸۵	۱/۳۹
مدل هیرش	۲۹۷۸/۵۶	۳۰۴۳/۳۸	۳۱۷۳/۰۷
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۴/۱۱	۲/۶۶	۴/۹۲
مدل اصلاح شده هالپین- تسای	۲۹۳۱/۵۶	۲۹۴۹/۴۳	۲۹۸۵/۴۴
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۲/۴۷	-۰/۵۱	-۱/۲۸
مدل لیونگود و گوتلر	۳۸۱۰/۹۸	۳۸۳۴/۱۷	۳۸۸۰/۸۷
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۳۳/۲۱	۲۹/۳۳	۲۸/۳۳
مدل اینشتین	۲۹۳۱/۹۸	۲۹۵۰/۱۹	۲۹۸۶/۶۱
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۲/۴۸	-۰/۴۹	-۱/۲۴
مدل وویگت	۳۰۷۴/۹۱	۳۲۳۶/۰۵۱	۳۵۵۸/۳۳
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۷/۴۸	۹/۱۶	۱۷/۶۶
مدل رئوس	۲۹۲۰/۷۶	۲۹۲۷/۷۷	۲۹۴۱/۹۲
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۲/۰۹	-۱/۲۴	-۲/۷۲
مدل کران بالای هاشین و اشتریکمن	۲۹۴۴/۹۷	۳۰۳۵/۱۲	۳۲۱۵/۴۹
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۲/۹۴	۲/۳۸	۶/۳۲
مدل کران پایین هاشین و اشتریکمن	۲۸۶۸/۶۹	۲۸۸۲/۶۶	۲۹۱۰/۷۲
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۰/۲۷	-۲/۷۶	-۳/۷۵

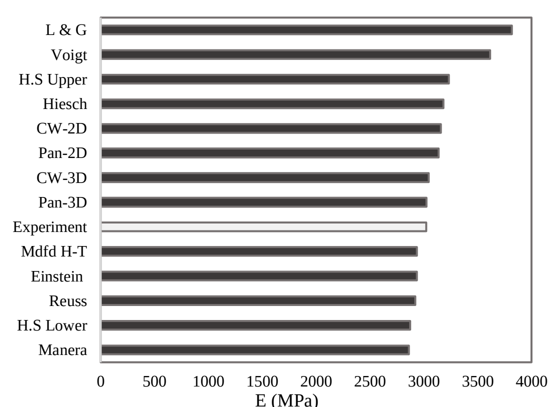
جدول ۸ مدول یانگ حاصل از نتایج تحلیلی و مقایسه با مقادیر آزمایش‌شده برای نمونه‌های حاوی نانوذرات Al_2O_3

مدل	PMMA + Al_2O_3 0.5 wt % (MPa)	PMMA + Al_2O_3 1.0 wt % (MPa)
نتیجهٔ آزمایش	۳۰۳۲/۶۰	۲۶۹۸/۹۰
مدل تقریب مانرا	۲۷۲۶/۶۳	۲۸۶۳/۲۳
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۱۰/۰۹	۶/۰۹
مدل پن دوبعدی	۳۰۲۶/۸۵	۳۱۳۹/۹۳
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۰/۱۹	۱۶/۳۴
مدل پن سه‌بعدی	۲۹۷۰/۳۱	۳۰۲۶/۸۵
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۲/۰۵	۱۲/۱۵
مدل کریستین و وال دوبعدی	۳۰۳۸/۰۲	۳۱۶۲/۲۶
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۰/۱۸	۱۷/۱۷
مدل کریستین و وال سه‌بعدی	۲۹۷۹/۷۲	۳۰۴۵/۶۶
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۱/۷۴	۱۲/۸۵
مدل هیرش	۳۰۴۹/۶۹	۳۱۸۵/۶۲
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۰/۵۶	۱۸/۰۳
مدل اصلاح‌شدهٔ هالپین– تسای	۲۹۲۵/۰۱	۲۹۳۶/۲۸
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۳/۵۵	۸/۷۹
مدل لیونگود و گوتلر	۳۸۰۲/۴۶	۳۸۱۷/۰۷
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۲۵/۳۸	۴۱/۴۳
مدل اینشتین	۲۹۲۴/۷۰	۲۹۳۵/۶۲
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۳/۵۵	۸/۷۷
مدل وویگت	۳۲۶۹/۰۲	۳۶۲۴/۲۸
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۷/۸۰	۳۴/۲۹
مدل رئوس	۲۹۱۸/۰۹	۲۹۲۲/۴۳
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۳/۷۷	۸/۲۸
مدل کران بالای هاشین و اشتریکمن	۳۰۴۷/۳۴	۳۲۳۹/۴۳
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	۰/۴۹	۲۰/۰۳
مدل کران پایین هاشین و اشتریکمن	۲۸۶۳/۶۹	۲۸۷۲/۵۵
تغییر نسبت‌به نتیجهٔ آزمایش (٪)	-۵/۵۷	۶/۴۳

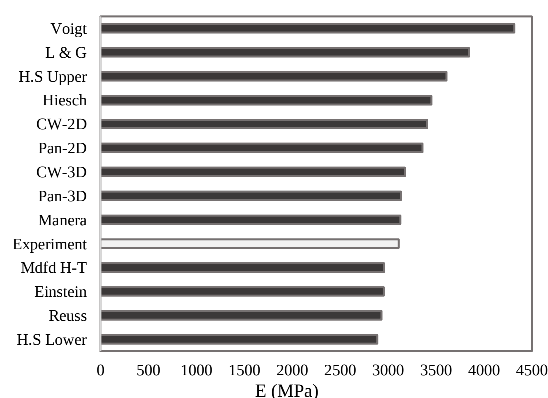
در ادامه، برای درک و مقایسهٔ بهتر، نتایج در قالب شکل‌های (۳) تا (۱۰) نیز مطرح و مقایسه شده‌اند. همان‌طوری که مشخص است در همهٔ موارد به‌جز اکسید سیلیسیم با ۰٫۵درصد وزنی و اکسید آلومینیوم با ۱/۰ درصد وزنی، نتایج حاصل از آزمایش در بازهٔ مدل‌های کران بالای وویگت و کران پایین رئوس و مدل کران بالا و پایین هاشین و اشتریکمن قرار گرفته‌است.



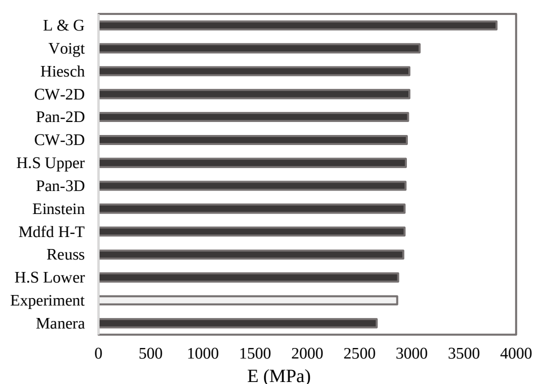
شکل ۳ مقایسهٔ مقادیر مدول یانگ حاصل از روابط تحلیلی با نمونهٔ مورد آزمایش حاوی 0.5% وزنی TiO_2



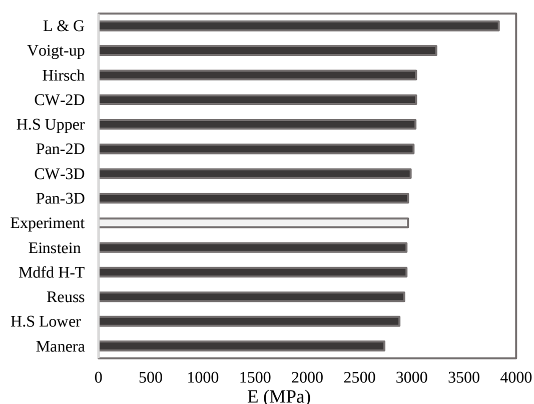
شکل ٤ مقایسهٔ مقادیر مدول یانگ حاصل از روابط تحلیلی با نمونهٔ مورد آزمایش حاوی 1.0% وزنی TiO_2



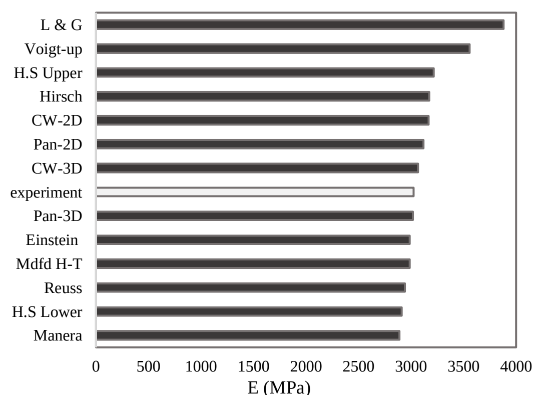
شکل ۵ مقایسهٔ مقادیر مدول یانگ حاصل از روابط تحلیلی با نمونهٔ مورد آزمایش حاوی 2.0% وزنی TiO_2



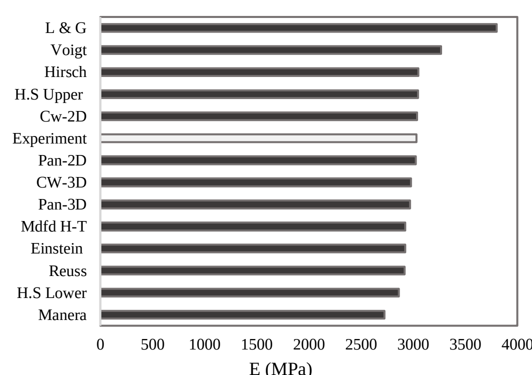
شکل ٦ مقایسهٔ مقادیر مدول یانگ حاصل از روابط تحلیلی با نمونهٔ مورد آزمایش حاوی 0.5% وزنی SiO_2



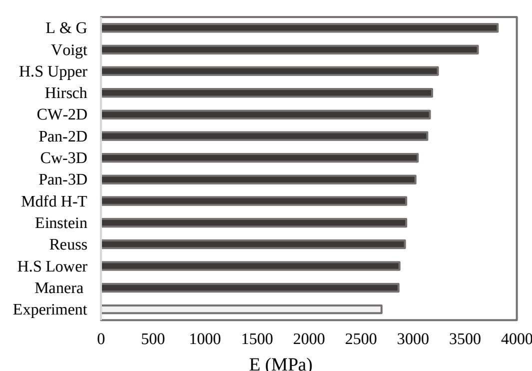
شکل ۷ مقایسهٔ مقادیر مدول یانگ حاصل از روابط تحلیلی با نمونهٔ مورد آزمایش حاوی 1.0% وزنی SiO_2



شکل ۸ مقایسهٔ مقادیر مدول یانگ حاصل از روابط تحلیلی با نمونهٔ مورد آزمایش حاوی 2.0% وزنی SiO_2



شکل ۹ مقایسهٔ مقادیر مدول یانگ حاصل از روابط تحلیلی با نمونهٔ مورد آزمایش حاوی 0.5% وزنی Al_2O_3



شکل ۱۰ مقایسهٔ مقادیر مدول یانگ حاصل از روابط تحلیلی با نمونهٔ مورد آزمایش حاوی 1.0% وزنی Al_2O_3

نتیجه‌گیری

در مطالعهٔ حاضر، اثرات افزودن مقادیر مختلف نانوذرات اکسیدی تیتانیوم، سیلیسیم و آلومینیوم به پلی‌متیل‌متاکریلات برروی خواص مکانیکی و مقایسهٔ نتایج آن با روابط تحلیلی بررسی گردید.

بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و مقایسهٔ آن‌ها با نتایج استخراج‌شده از روابط تحلیلی نتایج جالب توجهی را آشکار کرد. نانوذرات TiO_2 در هر سه درصد وزنی منجر به بهبود مدول الاستیسیتهٔ پلیمر پایه شدند. با افزودن ۰/۵، ۱ و ۲ درصد وزنی از نانوذرات TiO_2 به پلی‌متیل‌متاکریلات مدول الاستیسیته به‌ترتیب حدود ۱,۵، ٤ و ۷ درصد افزایش یافت. مقدار مدول الاستیسیته برای سه درصد وزنی ۰,۵، ۱ و ۲ درصد از نانوتقویت‌کننده‌های SiO_2 به‌ترتیب ۲-، ۲ و ٤ درصد و برای ۰,۵ و ۱ درصد وزنی Al_2O_3 به‌ترتیب ٤ و ۷/۵- درصد تغییر را گزارش داد. به‌جز دو مورد (۰/۵ درصد وزنی اکسیدسیلیسیم و ۱/۰ درصد وزنی اکسیدآلومینیوم)، در بقیهٔ موارد افزایش درصد وزنی تقویت‌کننده منجر به افزایش مدول یانگ مادهٔ حاصل شد. کاهش مدول یانگ برای کامپوزیت با ۰/۵ درصد وزنی اکسیدسیلیسیم هم می‌تواند به‌دلیل عدم پراکندگی یک‌نواخت نانوکامپوزیت‌ها باشد. در پژوهش آریماتیا و همکارانش [33] هم در ۱ درصد وزنی از نانوذرات آلومینا تغییری در مدول الاستیک ایجاد نگردید و حتی برخی از خواص مکانیکی دیگر نیز با کاهش همراه بود. در این پژوهش نیز کاهش مدول یانگ برای کامپوزیت با ۱/۰ درصد وزنی اکسیدآلومینیوم را می‌توان به اثر پیوند نامناسب بین ذرات تقویت‌کننده و مادهٔ پایه و یا ناسازگاری این دو ماده به‌خصوص در نسبت‌های حجمی بالاتر نسبت داد. این اثر از انتقال یک‌نواخت نیرو بین مادهٔ پایه و تقویت‌کننده جلوگیری می‌کند و عاملی برای کاهش در مدول یانگ به‌شمار می‌رود.

نتایج به‌دست‌آمده از روابط تحلیلی نشان می‌دهد که مدل‌های تئوری، برای تمامی نمونه‌ها به‌جز نمونهٔ با ۱,۰ درصد وزنی اکسیدآلومینیوم، روند را به درستی پیش‌بینی کرده‌است و در برخی مدل‌ها نتیجه را با دقت بالایی نسبت‌به نتایج تجربی ارائه می‌دهند. در واقع، می‌توان گفت رابطهٔ لیونگود و گوتلر تمامی نتایج را با اختلاف تقریبی ۲۳ تا ۳۳ درصد نسبت‌به نتایج آزمایشگاهی تخمین می‌زند که دلیل آن درصد پایین وزنی نانوکامپوزیت‌ها در این مطالعه است. مدل‌های کران بالا و پایین وویگت و رئوس و یا هاشین و اشتریکمن بازهٔ مناسبی را برای تخمین مدول یانگ کامپوزیت‌ها ارائه می‌دهند. مدل‌های سه‌بعدی پن و کریستین و وال هم مدول یانگ را با دقت بیشتری از مدل‌های دوبعدی آن‌ها پیش‌بینی می‌کنند. با بررسی خروجی مدل‌ها و مقایسهٔ آن‌ها با مقادیر آزمایشگاهی می‌توان گفت که مدل سه‌بعدی پن با اختلافی کم برای اکثریت نتایج، مقادیر دقیقی را پیش‌بینی می‌کند. مورد قابل ذکر در انتها که با افزایش درصد وزنی تقویت‌کننده پیش می‌آید، صحت نتایج برای مقادیر بیشتر از ۲/۰ درصد وزنی از تقویت‌کننده است. در این حالت

با افزایش مقادیر تقویت‌کننده، اثر کلوخه شدن پیش می‌آید که به‌دلیل عدم دخالت این اثر در روابط تحلیلی مذکور، نمی‌توان با قطعیت به نتایج فوق استناد کرد.

به‌طور کلی می‌توان مناسب‌ترین مدل‌ها را به تفکیک ذرات تقویت‌کننده در چند جمله خلاصه کرد:

۱. استفاده از درصدهای مختلف وزنی نانو ذرات تقویت‌کننده به‌منظور بهبود خواص مکانیکی پلی‌متیل‌متاکریلات عموماً منجر به افزایش مدول الاستیسیته شد. این افزایش وابسته به جنس ذرات تقویت‌کننده می‌باشد.

۲. اگر مقدار ذرات تقویت‌کننده از درصدی بیشتر شود منجر به ایجاد عیوب ساختاری می‌شود و به طبع آن موجب ثابت ماندن و حتی کاهش خواص مکانیکی مادهٔ مرکب حاصل می‌شود. در مطالعهٔ حاضر این مورد برای نانوذرات Al_2O_3 در ۱ درصد وزنی آشکار شد.

۳. از بین مدل‌های تحلیلی مطرح‌شده برای تقویت‌کنندهٔ تیتانیم اکسید مدل سه‌بعدی پن (دارای کم‌ترین میانگین اختلاف و کم‌ترین انحراف معیار) مناسب‌ترین مدل معرفی می‌شود.

٤. مدل تحلیلی که دقیق‌ترین پیش‌بینی را برای تقویت‌کنندهٔ سیلیسیم اکسید ارائه کند مدل پن سه‌بعدی (دارای کم‌ترین میانگین اختلاف) و مدل دوبعدی پن (دارای کم‌ترین انحراف معیار) است.

۵. مدل تحلیلی که مناسب برای تقویت‌کنندهٔ آلومینیوم اکسید باشد مدل هاشین کران پایین (دارای کم‌ترین میانگین اختلاف و کم‌ترین انحراف معیار) معرفی می‌گردد.

البته ذکر این نکته الزامی است که در صورت لزوم به انتخاب یک مدل برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با هر سه نوع نانوکامپوزیت‌های اکسی تیتانیم، اکسیدسیلیسیم و اکسیدآلومینیوم، بهترین گزینه مدل پن سه‌بعدی است که در هر سه نوع کامپوزیت نتایج نسبتاً دقیقی را ارائه می‌دهد.

مراجع

1. Saha, B., Toh, W.Q., Liu, E., Tor, S.B., and Lee, J., "A Study on Frictional Behavior of PMMA Against FDTS Coated Silicon as a Function of Load, Velocity and Temperature", *Tribology International*, Vol. 102, Pp. 44-51, (2016).
2. Eungkee Lee, R., Hasanzadeh, R., and Azdast, T., "A Multi-Criteria Decision Analysis on Injection Moulding of Polymeric Microcellular Nanocomposite Foams Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes", *Plastics, Rubber and Composites*, Vol. 46, Pp. 155-162, (2017).
3. Eungkee Lee, R., Afsari Ghazi, A., Azdast, T., Hasanzadeh, R., and Mamaghani Shishavan, S., "Tensile and Hardness Properties of Polycarbonate Nanocomposites in the Presence of Styrene Maleic Anhydride as Compatibilizer", *Advances in Polymer Technology*, doi 10.1002/adv.21832, (2017).
4. Liu, H., Ye, H., Lin, T., and Zhou, T., "Synthesis and Characterization of PMMA/Al_2O_3 Composite Particles by in Situ Emulsion Polymerization", *Particuology*, Vol. 6, Pp. 207-213, (2008).
5. Jiao, J., Sun, X., Pinnavaia, T. J., "Mesostructured Silica for the Reinforcement and Toughening of Rubbery and Glassy Epoxy Polymers", *Polymer*, Vol. 50, No. 4, Pp. 983-989, (2009).
6. Agag, T., Koga, T., and Takeichi, T., "Studies on Thermal and Mechanical Properties of Polyimide–Clay Nanocomposites", *Polymer*, Vol. 42, No. 8, Pp. 3399-3408, (2001).
7. Ahmad, F. N., Jaafar, M., Palaniandy, S., & Azizli, K. A. M., "Effect of Particle Shape of Silica Mineral on the Properties of Epoxy Composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 2, Pp. 346-353, (2008).
8. Ghavidel, A. K., Azdast, T., Shabgard, M. R., Navidfar, A., & Shishavan, S. M., "Effect of Carbon Nanotubes

on Laser Cutting of Multi-Walled Carbon Nanotubes/Poly Methyl Methacrylate Nanocomposites", *Optics & Laser technology*, Vol. 67, Pp. 119-124, (2015).

9. Opelt, C. V., Becker, D., Lepienski, C. M., & Coelho, L. A., "Reinforcement and Toughening Mechanisms in Polymer Nanocomposites–Carbon Nanotubes and Aluminum Oxide", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 75, Pp. 119-126, (2015).
10. Coetzee, Divan, et al., "Influence of Nanoparticles on Thermal and Electrical Conductivity of Composites", *Polymers*, Vol. 12.4 Pp. 742, (2020).
11. Liu, H. Y., Wang, G. T., Mai, Y. W., & Zeng, Y., "On Fracture Toughness of Nano-Particle Modified Epoxy", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 42, No. 8, Pp. 2170-2175, (2011).
12. Sun, S., Li, C., Zhang, L., Du, H. L., & Burnell-Gray, J. S., "Effects of Surface Modification of Fumed Silica on Interfacial Structures and Mechanical Properties of Poly (Vinyl Chloride) Composites", *European polymer journal*, Vol. 42, No. 7, Pp. 1643-1652, (2006).
13. Hua, Y., Gu, L., & Watanabe, H., "Micromechanical Analysis of Nanoparticle-Reinforced Dental Composites", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 69, Pp. 69-76, (2013).
14. Tucker III, C. L., & Liang, E., "Stiffness Predictions for Unidirectional Short-Fiber Composites: Review and Evaluation", *Composites science and technology*, Vol. 59, No. 5, Pp. 655-671, (1999).
15. Islam, M. S., Masoodi, R., & Rostami, H., "The Effect of Nanoparticles Percentage on Mechanical Behavior of Silica-Epoxy Nanocomposites", *Journal of Nanoscience*, Vol. 2013, Pp. 1-10, (2013)
16. Fereydoun, A., Mohammad Zamani, M. and Mohammad Zamani, M., "Experimental Investigation of Tensile Properties of PP/CNTs: Comparison of Experimental and Analytical Results", *First national conference of nanomaterials and nanotechnology*, Shahroud, Iran, (2011). (In Persian)
17. Hu, H., Onyebueke L., Abatan, A., "Characterizing and Modeling Mechanical Properties of Nanocomposites-Review and Evaluation", *Journal of minerals and materials characterization and engineering*, Vol. 9, No. 04, Pp. 275, (2010).
18. Manera, M., "Elastic Properties of Randomly Oriented Short Fiber-Glass Composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 11, No. 2, Pp. 235-247, (1977).
19. Tsai, S. W., and Pagano, N. J., "Invariant Properties of Composite Materials", *Composite Materials Workshop, Technomic Publishing Co., Stamford, Conn.*, Pp.233-238, (1968).
20. Pan, N., "The Elastic Constants of Randomly Oriented Fiber Composites: A New Approach to Prediction", *Science and Engineering of composite materials*, Vol. 5, No. 2, Pp. 63-72, (1996).
21. Christensen, R. M., Waals. F. M., "Effective Stiffness of Randomly Oriented Fibre Composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 6, No .3, Pp. 518-535, (1972).
22. Lee, L. H., "Strength-Composition Relationships of Random Short Glass Fiber-Thermoplastics Composites", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 9, Pp. 213-219, (1969).
23. Thostenson, E. T., Ren, Z., & Chou, T. W., "Advances in the Science and Technology of Carbon Nanotubes and their Composites: A Review", *Composites science and technology*, Vol. 61, No. 13, Pp. 1899-1912,

(2001).

24. Halpin, J. C., "Stiffness and Expansion Estimates for Oriented Short Fiber Composites", *Journal of Composite Materials*, Vol. 3, No. 4, Pp. 732-734, (1969).
25. Tsai, S. W., Halpin, J. C., Pagano. N. J., "Composite Materials Workshop", (1968).
26. Einstein, A., "On the Movement of Small Particles Suspended in Stationary Liquids", *Annalen der Physik*, Vol. 17, Pp. 549–560, (1905).
27. Einstein, A., "Investigations on the Theory of the Brownian Movement", *Courier Corporation*, (1956).
28. Voigt, W., "Ueber die Beziehung Zwischen den Beiden Elasticitätsconstanten Isotroper Körper", *Annalen der Physik*, Vol. 274, No. 12, Pp. 573-87, (1889).
29. Reuss, A., "Berechnung der Fliebgrenze von Mischkristalen auf Grund der Plastizitatsbedingung fur Einkristalle", *ZAMM*, Vol. 9, Pp. 49-58, (1929).
30. Hashin, Z., Shtrikman, S., "A Variational Approach to the Theory of the Elastic Behaviour of Multiphase Materials", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol, 11. No. 2, Pp. 127-140, (1963).
31. Hashin, Z., "Analysis of Composite Materials", *J. appl. Mech*, Vol, 50, No. 2, Pp. 481-505, (1983).
32. Shirkavand, S., Moslehifard, E., "Effect of TiO_2 Nanoparticles on Tensile Strength of Dental Acrylic Resins", *Journal of dental research, dental clinics, dental prospects*, Vol. 8, No. 4, Pp. 197, (2014).
33. Arimatéia, Rafaela R., et al., "Effect of Alumina on the Properties of Poly (Methyl Methacrylate)/Alumina Composites Obtained by Melt Blending", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol, 34, No. 4, Pp. 451-471, (2021).